

## МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ ОСВОЕННЫХ РАВНИН

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия  
e-mail: mlcvkirill@rambler.ru; luleo123@mail.ru*

Проведена классификация малых водосборов по четырем морфометрическим характеристикам, определяющим энергию рельефа: средняя высота, вертикальная расчлененность, густота овражно-балочной сети и средний уклон. Для выполнения классификации был использован метод Варда, в качестве операционно-территориальной единицы использовался элементарный водосбор. Районирование позволяет разработать рекомендации по размещению сельскохозяйственных культур для снижения темпов смыва почв и уменьшения количества наносов, поступающих со склонов в русла постоянных и временных водотоков. Апробирование методики было выполнено в пределах верховьев р. Медведицы (бассейн р. Дон). Выделено шесть классов элементарных водосборов, проведено их ранжирование по энергии рельефа. Составленная карта районирования элементарных водосборов может быть использована для совершенствования структуры землепользования и включения в севообороты сельскохозяйственных культур, обладающих разной почвозащитной эффективностью.

**Ключевые слова:** эрозия, метод Варда, малый водосбор, смыв почв.

DOI: 10.7868/S0435428117030075

### Введение

Являясь одной из главных причин формирования поверхностного стока и всего спектра склоновых процессов, рельеф обуславливает дифференциацию ландшафтов даже на небольших территориях. Анализ вклада рельефа в функционирование геосистем требует изучения его количественных характеристик. Наиболее эффективным при этом является морфометрический анализ, который базируется на применении цифровых моделей рельефа (ЦМР) и геоинформационных систем (ГИС) и может быть использован в самых разных областях географических знаний. Так, например, морфометрический анализ и моделирование на основе ЦМР применяется для составления цифровых почвенных карт [1], при построении карт зон затопления [2], распространения растительности [3]. Кроме того, морфометрический анализ, реализованный в ГИС, широко используется для районирования, под которым мы подразумеваем выделение территориальных единиц в ранге районов со схожими признаками. В настоящий момент существует ряд областей применения районирования на основе совместного использования ЦМР и морфометрического анализа: например, ландшафтное районирование [4], выделение структурных элементов рельефа (талвегов, водораздельных линий), эродированных земель по набору морфометрических показателей [5], новейших тектонических движений [6] и некоторые другие виды.

Районирование территории на основе морфометрических признаков может выполняться для самых разных масштабных уровней, причем не только для изучения рельефа территорий суши, но и дна водоемов [7, 8]. На современном этапе развития ГИС морфометрическое районирование может быть выполнено в полуавтоматическом режиме. Существует пять главных методических вопросов, с которыми необходимо определиться перед началом работы [9] — это выбор: 1 — территориальной единицы, 2 — признаков, на основе которых будет выполнено отнесение территориальной единицы к тому или иному классу, 3 — математического алгоритма, который будет использоваться для классификации, 4 — меры близости между классами и 5 — определение количества классов, на которые будут разделены объекты классификации.

В приложении к решению задач по оптимизации землепользования в пределах освоенных равнин умеренного пояса нами была разработана методика морфометрического районирования территории, где в качестве операционно-территориальной единицы (ОТЕ) были использованы элементарные водосборные бассейны. Под оптимизацией землепользования мы понимаем организацию размещения пахотных, пастбищных и луговых угодий на основе их сбалансированного соотношения в пределах конкретного речного бассейна в зависимости от его морфометрических показателей, что способствовало бы минимизации деградации земель в связи с развитием эрозионных процессов и снижению поступления наносов и загрязняющих веществ в постоянные водотоки и водоемы. При этом мы исходим из того, что именно морфометрические характеристики малых водосборов различного класса определяют эрозионную опасность в пределах конкретного речного бассейна. В то же время оптимальное размещение различных угодий способно максимально сократить потери почв в результате развития плоскостного смыва и линейной эрозии. К тому же совмещенный анализ фактического землепользования и его изменений за последние десятилетия для малых водосборов различного класса позволяет оценить фактически сложившуюся ситуацию и сопоставить ее с оптимальной с точки зрения сохранения плодородия почв и снижения загрязнения поверхностных вод.

### Методика

**Построение модели гидрографической сети и выделение границ элементарных водосборов.** При проведении районирования с использованием ЦМР и ГИС в качестве ОТЕ чаще всего применяются ячейки регулярной сетки. Это объясняется тем, что морфометрические показатели вычисляются в узлах этой сетки, описывающих ячейки фиксированного размера (как правило, квадратные или прямоугольные). Поэтому во многих случаях логично использовать в качестве ОТЕ именно узел регулярной сетки. Между тем, при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов или анализе изменения структуры землепользования правильнее использовать в качестве ОТЕ водосборные площади [10, 11].

Построение границ водосборов осуществлялось с использованием ГИС “WhiteBox GAT” [12] и глобальной цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle radar topographic mission). К полученной модели был применен хорошо известный среди ГИС-специалистов алгоритм ее подготовки (рис. 1, этап 1) для последующего построения карты тальвегов временной и постоянной гидрографической сети (рис. 1, этап 2) и их водосборов (рис. 1, этап 3). Детальное описание данного алгоритма впервые было приведено в статье Дж. Каллахана и Д. Марка [15], а в более поздних работах, в том числе и русскоязычных [16], можно встретить его вариации.

**Оценка точности выделения водосборов.** Для оценки точности построения границ водосборов нами был выполнен их сравнительный анализ; сами границы при этом были построены и в автоматическом режиме согласно описанной выше методике, и вручную по топографическим картам. Для сравнительного анализа был использован участок, расположенный в северо-восточной залесенной части бассейна р. Медведицы (рис. 2). В ходе данного этапа работ по топографическим картам были оцифрованы 36 элементарных водосборов, их площадь была сопоставлена с площадью водосборов, построенных по предлагаемой методике. Результат выделения границ (согласно обоим методам) представлен на рис. 2, статистика площадей бассейнов – в табл. 1.

В ходе выполненного качественного анализа полученной карты водосборов было установлено, что границы, проведенные вручную, хорошо согласуются с границами, полученными в автоматическом режиме. Количественный анализ показал, что максимальная ошибка не превышает 12%, а средняя – 3%. При этом наибольшие ошибки характерны для водосборов площадью менее 10 км<sup>2</sup>, а наименьшие – для водосборов



Рис. 1. Блок-схема этапов предлагаемой методики

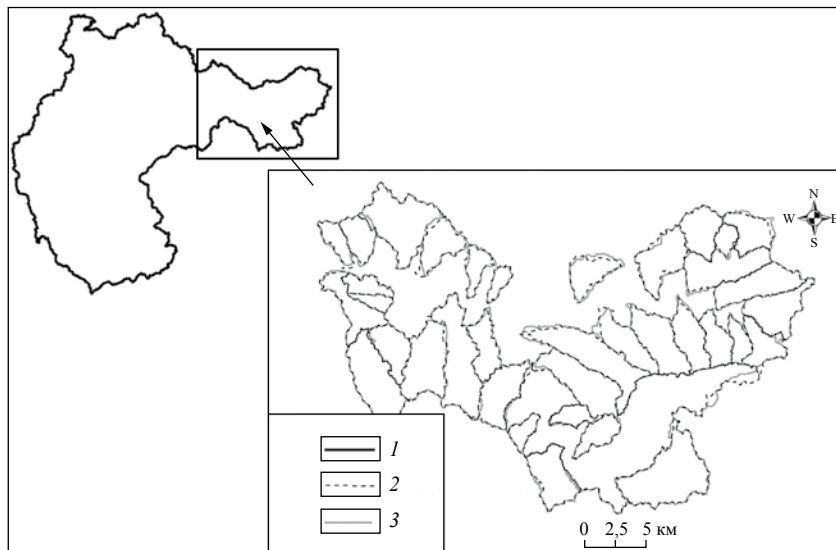


Рис. 2. Сопоставление границ элементарных водосборов

Границы: 1 – территории исследования; элементарных водосборов: 2 – созданные в автоматическом режиме по ЦМР, 3 – оцифрованные вручную по топографическим картам

**Сопоставление некоторых статистических данных по площадям элементарных водосборов, определенных различными методами**

Количество бассейнов	Площадь, км <sup>2</sup>		
	средняя	минимальная	максимальная
$\frac{36}{36}$	$\frac{13.32}{13.42}$	$\frac{3.05}{3.07}$	$\frac{85.63}{85.16}$

*Примечание:* в числителе указаны площади водосборов, выделенные вручную, в знаменателе – в автоматическом режиме.

площадью 10–20 км<sup>2</sup>. Следует отметить, что величина средних ошибок несколько больше, чем для территории Республики Татарстан [17].

**Расчет морфометрических показателей.** В настоящее время существует довольно большое количество морфометрических параметров, предложенных для количественной характеристики рельефа [18, 19]. Сами показатели и способы их получения с использованием ГИС и ЦМР также достаточно подробно описаны во многих работах отечественных [20–22] и зарубежных исследователей [23, 24]. Среди наиболее часто используемых можно выделить такие показатели как высота, угол наклона, экспозиция, кривизна продольного и поперечного профилей и др.

При проведении районирования территории по совокупности морфометрических признаков обычно используют различные наборы параметров. Например, Ю.А. Кочеткова [25] предлагает систему из четырех показателей: абс. высота, глубина вертикального расчленения, горизонтальная расчлененность рельефа, наклон поверхности междуречий. Для районирования рельефа Большого Кавказа А.В. Погорелов [26] применил комплекс статистических показателей абс. высоты земной поверхности – стандартное отклонение и асимметрию. Для выполнения морфометрического районирования части Новосибирской области Д.А. Чупина [27] использовала абс. высоту, угол наклона, а также статистические показатели этих морфометрических величин. Румынские исследователи в одной из своих работ [28] для морфометрического районирования предложили высоту, угол наклона и кривизну поверхности, а международный коллектив авторов [29] для ландшафтного районирования вулканического рельефа – высоту, угол наклона, а также густоту временной и постоянной гидрографической сети.

Во всех вышеперечисленных случаях в качестве ОТЕ использовался узел регулярной сетки, а мы предлагаем рассматривать водосборные бассейны, для выделения классов которых на исследуемой территории применялся набор из следующих морфометрических показателей: абс. высота, уклон, перепад между минимальной и максимальной высотами, густота овражно-балочной сети. Цифровая модель углов наклона была получена на основе ЦМР изучаемой территории и программного продукта ArcGIS, где применяется алгоритм расчета углов наклона, изложенный в работе П. Берроу и Р. Макдоннелла [30].

Для вычисления уклона ( $S$ ) в градусах формула принимает вид:

$$S = \frac{180}{\pi} \arctg \left[ \sqrt{\left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} \right], \quad (1)$$

где  $\partial z / \partial x$  и  $\partial z / \partial y$  – частные производные вдоль координатных осей, которые рассчитываются по формулам:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)}{8\Delta x} \quad (2)$$

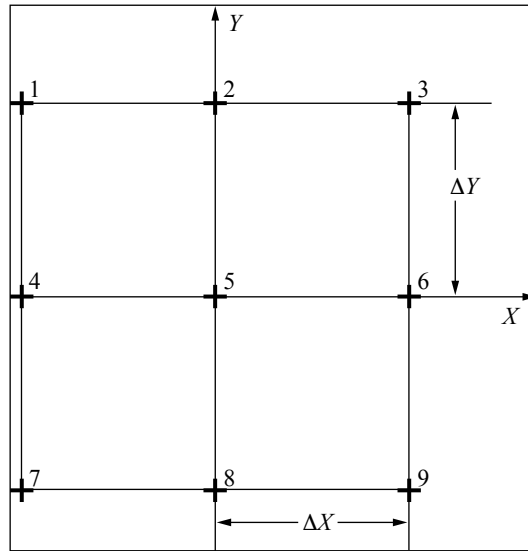


Рис. 3. Схема расположения узлов регулярной сетки для иллюстрации методов оценки производных

и

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)}{8\Delta y}, \quad (3)$$

где  $Z_1, Z_2, \dots, Z_9$  – значения цифровой модели рельефа в узлах регулярной сетки, расположение которых показано на рис. 3,  $\Delta x$  – шаг сетки по  $X$ ,  $\Delta y$  – шаг сетки по  $Y$ .

Средняя высота в пределах бассейна, перепад между максимальными и минимальными высотами были рассчитаны в том же программном продукте. Густота овражно-балочной сети ( $G$ ) была определена по формуле:

$$G = \frac{\sum l_b}{F}, \quad (4)$$

где  $\sum l_b$  – сумма длин тальвегов временных и постоянных водотоков в пределах элементарного водосбора (м) [31],  $F$  – площадь элементарного водосбора ( $\text{км}^2$ ).

**Классификация элементарных водосборов.** На основе выбранных ранее морфометрических показателей была выполнена автоматизированная классификация элементарных водосборов, каждому из которых присвоен номер класса. Для этого был использован метод Варда, где в качестве расстояния между классами берется прирост суммы квадратов расстояний объектов до центров классов, получаемый в результате их объединения. В отличие от других методов оценки расстояний между классами здесь используется дисперсионный анализ. На каждом шаге алгоритма объединяются такие два класса, которые приводят к минимальному увеличению целевой функции, т.е. внутригрупповой суммы квадратов. Этот метод направлен на объединение близко расположенных классов и “стремится” создавать классы малого размера [32]. В настоящий момент в алгоритмах классификации используются меры близости, или расстояния между классами: евклидово, манхэттенское, Чебышева, степенное и т.д. В нашей работе было применено евклидово расстояние.

**Территория исследования.** В качестве объекта исследования был выбран водосбор р. Медведицы (бассейн р. Дон, замыкающий створ – в г. Аткарск) (рис. 4), который располагается в более низкой и пологой юго-западной части Приволжской возвышенности. Площадь водосбора, на котором отрабатывалась методика, составляет

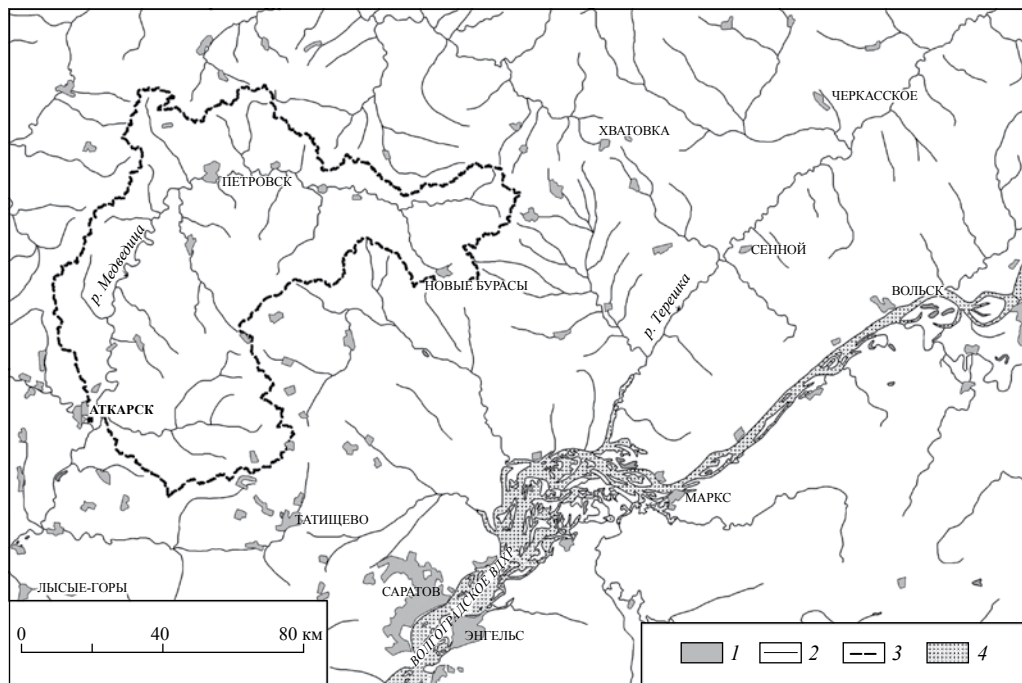


Рис. 4. Бассейн р. Медведицы (выше г. Аткарск)

1 — населенные пункты, 2 — реки, 3 — границы исследуемого водосбора, 4 — озера и водохранилища

3619.7 км<sup>2</sup>, абс. отметки высот 160–260 м (средняя величина — 228 м над у.м.). Склоны водосбора имеют небольшую крутизну (в среднем 2°), однако в восточной части водосбора на водоразделе рр. Медведицы и Терешки, где появляются гряды высоких холмов, она несколько возрастает. В верховьях бассейна наиболее широко распространены образования мелового и палеогенового возраста (известняки и мергели). Талые воды отступающего днепровского ледника привели к образованию большого количества современных балок. Почвы на склонах междуречья исследуемого водосбора — выщелоченные черноземы, в северо-восточной части — серые лесные.

Территория водосбора верховьев р. Медведицы используется в сельскохозяйственных целях (табл. 2). Большую его часть в настоящее время занимают пашня (62%), луга (19%) и леса (17%). На долю водоемов и населенных пунктов в сумме

Таблица 2

**Динамика изменения землепользования в верховьях водосбора р. Медведицы**

Категория земель	1985–1989 гг.		2014–2015 гг.	
	площадь, га	% от общей площади	площадь, га	% от общей площади
Лес	49650.9	13.7	59662.1	16.5
Луг	55306.0	15.3	68245.1	18.8
Пашня	247715.5	68.4	223973.7	61.9
Водоемы	1059.4	0.3	768.9	0.2
Населенные пункты	8238.3	2.3	9320.3	2.6
<i>Всего</i>	361970.1	100.0	361970.1	100.0

приходится около 2% площади от всего водосбора. За последние 30 лет произошли небольшие изменения в землепользовании за счет сокращения площади обрабатываемых земель.

## Результаты

В бассейне р. Медведицы (выше створа г. Аткарск) были выделены 982 элементарных водосбора первого порядка. Их площадь изменяется от 0.02 до 19.27 км<sup>2</sup>, а средний размер составляет 3.7 км<sup>2</sup>. Для каждого элементарного водосбора был получен набор из четырех морфометрических характеристик: средняя высота бассейна (м), средний уклон (град.), перепад высот (м), густота овражно-балочной сети (м/км<sup>2</sup>). В результате была сформирована геоинформационная база данных, в которую вошли площадные

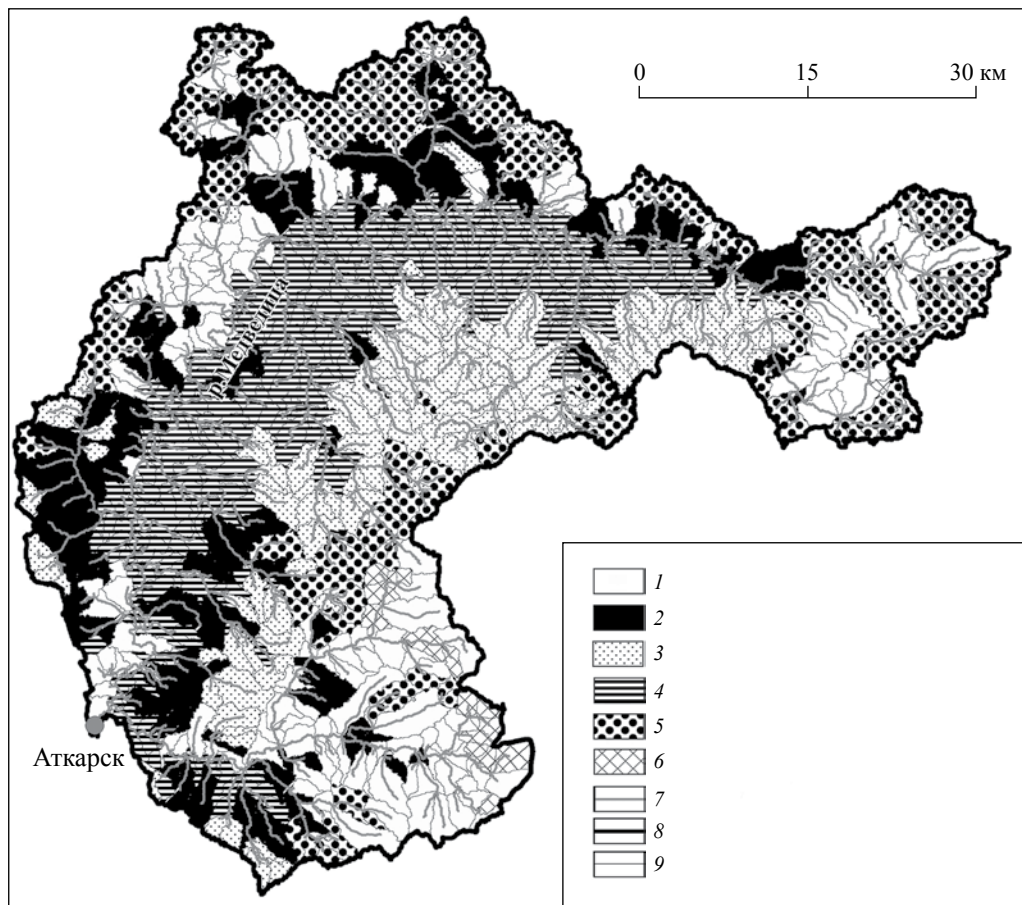


Рис. 5. Карта морфологического районирования бассейна р. Медведицы (выше г. Аткарск) по классам элементарных водосборов

*Элементарные водосборы, расположенные:* 1 – в нижней части пологого левого берега с густотой эрозионной сети 2.64, уклонами 1.6 и перепадами высот 27 м, 2 – в средней части пологого левого берега с густотой эрозионной сети 2.43, уклонами 1.4 и перепадами высот 34 м, 3 – на правом крутом берегу с густотой эрозионной сети 2.40, уклонами 1.8 и перепадами высот 58 м, 4 – в верхней части пологого левого и крутого правого берегов с густотой эрозионной сети 2.30, уклонами 1.9 и перепадами высот 55 м, 5 – в верхней части пологого левого и крутого правого берегов с густотой эрозионной сети 2.27, уклонами 2.6 и перепадами высот 80 м, 6 – в пределах водораздельных пространств с густотой эрозионной сети 1.98, уклонами 4.4 и перепадами высот 99 м; 7 – водотоки; *границы:* 8 – бассейна, 9 – элементарных водосборов

объекты элементарных водосборов и пять полей таблицы атрибутивной информации по каждому из них, включая и порядковый номер водосбора.

На основании данной базы морфометрических показателей была проведена классификация элементарных водосборов. В настоящее время не существует принятой всеми разбивки на классы, большинство исследователей сходятся в том, что нужно пробовать разные варианты, например, следующие: характеристики объектов одного класса статистически значимо отличаются от таковых другого или есть возможность содержательной интерпретации каждого выделенного класса. В нашем случае в ходе проведения классификации было опробовано использование разного количества классов: от пяти до десяти. При делении на семь, восемь, девять и десять разрядов оценка статистической значимости различия средних показателей морфометрических характеристик между классами продемонстрировала, что существуют такие, которые отличаются статистически незначимо. В случае использования пяти и шести классов все они различаются значимо, поэтому нами был использован вариант разбивки совокупности элементарных водосборов на шесть классов. На основе полученной классификации была построена тематическая карта морфометрического районирования (рис. 5). Среднестатистические характеристики водосборов различных классов приведены в табл. 3.

Наибольшее число элементарных водосборов первого класса (339) расположено преимущественно в нижней части левобережья р. Медведицы (рис. 5). Эта территория характеризуется самыми низкими гипсометрическими отметками, малым перепадом высот и одними из самых незначительных величинами уклонов (табл. 3). В то же время этот класс водосборов отличается самым высоким показателем густоты овражно-балочного расчленения. Такое соотношение морфометрических параметров позволяет отнести его к водосборам с самой низкой энергией рельефа и, соответственно, к наиболее пригодным для выращивания пропашных сельскохозяйственных культур, опасных в эрозионном отношении.

Наименьший по занимаемой площади шестой класс элементарных водосборов, преобладающий в верховьях бассейна р. Медведицы и ряда ее левобережных притоков, характеризуется морфометрическими показателями, которые определяют наибольшую энергию рельефа (табл. 3). Вместе с тем этот класс водосборов отличается минимальным значением овражно-балочного расчленения. Это дает возможность говорить о наименьшей степени пригодности его склонов для пашни. Распашка склоновых земель этих водосборов возможна только при использовании комплекса противоэрозионных мероприятий. Остальные четыре класса элементарных водосборов (со второго по пятый) с точки зрения энергетического потенциала рельефа занимают промежуточное положение между вышеперечисленными. Выявляется территориальная привязанность водосборов первого и второго класса к правобережной части бассейна р. Медведицы, тогда как в более пологосклонной левобережной преобладают

*Таблица 3*

**Среднестатистические характеристики выделенных классов водосборов**

Класс (количество бассейнов)	Высота, м	Уклон, град.	Густота овражно-балочной сети, км/км <sup>2</sup>	Перепад высот, м
1(339)	188.8	1.6	2.64	27
2(151)	225.6	1.4	2.43	34
3(144)	207.9	1.8	2.40	58
4(193)	253.1	1.9	2.30	55
5(136)	226.8	2.6	2.27	80
6(19)	263.4	4.4	1.98	99



водосборы третьего, четвертого и пятого классов, которые характеризуются наиболее низким энергетическим потенциалом рельефа.

Составленная карта классов водосборных бассейнов может быть использована в прикладных целях для разработки рекомендаций по оптимизации землепользования в бассейне р. Медведицы. Проведенная классификация позволяет оценить необходимое соотношение пастбищно-луговых и пахотных земель для снижения эрозионной потери почв, а также набор высеваемых культур (зерновых, кормовых и пропашных), исходя из возможности снижения темпов смыва почв и количества поступающих в постоянные водотоки наносов и переносимых вместе с ними загрязняющих веществ.

### Заключение

Предложенная методика районирования речных бассейнов освоенных равнин на основе классификации их элементарных водосборов по четырем морфометрическим параметрам, определяющим энергию рельефа, позволяет установить оптимально возможное соотношение обрабатываемых (пашня), слабонарушенных (пастбища) и ненарушенных (лес, луг) земель для минимизации темпов смыва почв и сокращения доли наносов, транспортируемых в постоянные водотоки со склонов в периоды формирования на них поверхностного стока.

Разработанная методика позволила выделить шесть классов элементарных водосборов в верховьях бассейна р. Медведицы, которые отличаются по энергии рельефа. Построенная карта районирования может быть использована для разработки рекомендаций по улучшению землепользования на этой территории, оптимизация структуры которого может быть достигнута за счет включения в оборот сельскохозяйственных культур с учетом их почвозащитной эффективности.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 15–17–20006).

**Acknowledgements.** The study was funding by the RSF, project No. 15–17–20006.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гопп Н.В. Алгоритмический подход при составлении цифровых почвенных карт на основе лабораторно-полевых и спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 58–73.
2. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мозжерин В.В., Гилязов А.Ф., Сатдаров А.З., Гареев Р.М., Мишанина О.Е. Оценка вероятности высоты и площади затопления днищ речных долин в период весеннего половодья для обеспечения безопасности нефтедобычи // Нефтяное хозяйство. 2015. № 11. С. 145–149.
3. Mikolajczak A., Marüchal D., Sanz T., Isenmann M., Thierion V., and Luque S. Modelling spatial distributions of alpine vegetation: A graph theory approach to delineate ecologically-consistent species assemblages // Ecological Informatics. 2015. Vol. 30. P. 196–202.
4. Горюхов А.Н., Макаров В.С., Васильев Н.Ф., Федоров А.Н. Методические подходы к составлению ландшафтной карты на основе ГИС-технологий (на примере Нерюнгринского промышленного комплекса Якутии) // Проблемы региональной экологии. 2009. № 3. С. 15–19.
5. Каличкин В.К., Павлова А.И. Применение нейронной экспертной системы для классификации эрозионных земель // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2014. № 6. С. 5–11.
6. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1960. 94 с.
7. Михалев В.В., Мацкевич И.К. Современная морфометрия Камского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2010. № 3. С. 4–19.
8. Перевощикова О.А., Калинин В.Г. К оценке пространственных неоднородностей рельефа дна долинных водохранилищ (на примере Камского) // Географический вестник. 2014. № 3 (30). С. 18–26.

9. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. М.: Статистика, 1973. 238 с.
10. Ермолаев О.П. Эрозия в бассейновых геосистемах. Казань: Унипресс, 2002. 264 с.
11. Дунаева Е.А., Коваленко П.И. Типизация бассейнов рек Крыма по агроландшафтам и экологической нагрузке на них // Научный журнал российского НИИ проблем мелиорации. 2013. № 4(12). С. 157–167.
12. Lindsay J.B. The whitebox geospatial analysis tools project and open-access GIS / Proceedings of the GIS Research UK 22<sup>nd</sup> Annual Conference, The University of Glasgow. 2014. P. 15–19.
13. Данные SRTM [Электронный ресурс] – <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. (дата обращения 15.01.2016).
14. Szaby G., Singh S.K., and Szaby S. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2015. Vol. 83–84. P. 137–145.
15. O'Callaghan J. and Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data // Comput. Vis. Graph. Image Process. 1984. Vol. 28(3). P. 323–344.
16. Погорелов А.В., Думит Ж.А. Рельеф бассейна р. Кубани: морфологический анализ. М.: ГЕОС, 2009. 218 с.
17. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А. Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа // География и природные ресурсы. 2014. № 3. С. 32–39.
18. Ласточкин А.Н. Рельеф земной поверхности (Принципы и методы статической геоморфологии). Л.: Недра, 1991. 340 с.
19. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. М. – Смоленск: Изд-во Смоленск. гос. ун-та, 1998. 272 с.
20. Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures // Mathematical Geology. 1995. Vol. 27. P. 373–390.
21. Shary P., Sharaya L., and Mitusov A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107 (1–2). P. 1–32.
22. Florinsky I. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models // Intern. Journ. of Geograph. Inform. Sc. 1998. 12 (1). P. 47–62.
23. Zevenbergen L. and Thorne C. Quantitative analysis of land surface topography // Earth Surface Processes Landforms. 1987. Vol. 12. P. 47–56.
24. Pennock D., Zebarth B., and de Jong E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain // Geoderma. 1987. Vol. 40. P. 297–315.
25. Кочеткова Ю.О. Эколого-геоморфологическая оценка морфометрических особенностей рельефа Рязанской области // Вестн. Волжск. ун-та им. В.Н. Татищева. 2011. № 12. 25 с.
26. Погорелов А.В., Бойко Е.С., Нетребин П.Б. Опыт автоматизированной идентификации элементов морфологической структуры Большого Кавказа // Инженерные изыскания. 2010. № 5. С. 32–35.
27. Чупина Д.А. Автоматическое выделение форм и комплексов рельефа на основе морфометрического ГИС-анализа (на примере Венгеровского района Новосибирской области) // Геоморфология. 2014. № 3. С. 43–50.
28. Verhagen P. and Drăguț L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping // Journ. of Archaeol. Sc. 2012. 39(3). P. 698–703.
29. Kassouk Z., Thouret J.-C., Gupta A., Solikhin A., and Liew S.C. Object-oriented classification of a high-spatial resolution SPOT5 image for mapping geology and landforms of active volcanoes: Semeru case study, Indonesia // Geomorphology. 2014. Vol. 221. P. 18–33.
30. Burrough P.A. and McDonnell R.A. Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 1998. 190 p.
31. Мордвинцев М.М., Кувалкин А.В. Методика типизации участков водосборной площади для построения расчетных моделей “Осадки–Сток” // 13 пленарн. межвуз. координац. совещ. по проблеме эрозийных, русловых и устьевых процессов (г. Набережные Челны, 8–10 октября 2015 г.): Доклады и краткие совещания. Набережные Челны: Набережночелнинский ин-т соц.-пед. технологий и ресурсов, 2015. С. 176–179.
32. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journ. of the American statistical assoc. 1963. Vol. 58. No. 301. P. 236–244.
33. Морфоструктура и морфоскульптура платформенных областей равнин СССР. М.: Наука, 1986. 195 с.

Поступила в редакцию 11.03.2016

Принята к печати 14.03.2017

# MORPHOLOGICAL TYPOLOGY OF SMALL CATCHMENTS IN RIVER BASINS ON CULTIVATED PLAINS

K.A. MALTSEV, A.G. SHARIFULLIN

Kazan Federal University, Kazan, Russia  
e-mail: mlcvkirill@rambler.ru, luleo123@mail.ru

## Summary

Small catchments were classified with four morphometric characteristics that determine the relief energy: mean altitude, vertical relief, drainage density and average slope. Classification was produced using the Ward's method and elementary catchment as a basic spatial unit. The created typology allows to elaborate recommendations on spatial distribution of crops aimed at reduction of soil erosion rates and the amounts of sediments yielded from slopes to channels of perennial and intermittent streams. The elaborated methodology was tested in the upper Medveditsa River basin (the Don River system). Six classes of elementary catchments were designated and ranked according to the relief energy. The compiled map of small catchment types may be applied for the improvement of land use practice and planning of crop rotation with respect to soil protection efficiency.

**Keywords:** erosion, Ward's method, sub-basin, soil erosion.

## REFERENCES

1. Gopp N.V. Algorithmic approach in the preparation of digital soil maps based on laboratory and field and satellite data. *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2013. No. 3. P. 58. (in Russ.)
2. Ermolayev O.P., Malcev K.A., Mozzherin V.V., Gilyazov A.F., Satdarov A.Z., Gareyev R.M., and Mishanina O.E. Estimation of the probability of flooding height and area of the bottoms of river valleys during the spring flood to ensure the safety of oil. *Neft. Hoz.* 2015. No. 11. P. 145–149. (in Russ.)
3. Mikolajczak A., Marüchal D., Sanz T., Isenmann M., Thierion V., and Luque S. Modelling spatial distributions of alpine vegetation: A graph theory approach to delineate ecologically-consistent species assemblages. *Ecological Informatics*. 2015. Vol. 30. P. 196–202.
4. Gorohov A.N., Makarov V.S., Vasilyev N.F., and Fedorov A.N. Methodological approaches to the preparation of the landscape map based on GIS technologies (for example, Neryungri, Yakutia industrial complex). *Probl. Region. Ekol.* 2009. No. 3. P. 15–19. (in Russ.)
5. Kalichkin V.K. and Pavlova A.I. Application of neural expert system for the classification of land erosion. *Sib. Bul. Agric. Sci.* 2014. No. 6. P. 5–11. (in Russ.)
6. Filosofov V.P. *Kratkoe rukovodstvo po morfometricheskomu metodu poiskov tektonicheskikh struktur* (Quick Guide to morphometric method searches tectonic structures). Saratov: Izd-vo Saratov. un-ta (Publ.), 1960. 94 p.
7. Mihalev V.V. and Matskevich I.K. Modern morphometry Kama reservoir. *Vodn. Hoz. Ros.: probl., techn., uprav.* 2010. No. 3. P. 4–19. (in Russ.)
8. Perevoschikova O.A. and Kalinin V.G. By the estimation of the spatial inhomogeneities bottom topography valley reservoirs (by the example of the Kama). *Geogr. Vestn.* 2014. No. 3(30). P. 18–26. (in Russ.)
9. Aivazyan S.A., Bezhaeva Z.I., and Staroverov O.V. *Klassifikatsiya mnogomernykh nablyudeniy* (The classification of multidimensional observations). Moscow: Statistika (Publ.), 1973. 238 p.
10. Ermolaev O.P. *Eroziya v basseynovykh geosistemakh* (Erosion in the river basin geosystems). Kazan: Izd-vo Unipress (Publ.), 2002. 264 p.
11. Dunaeva E.A. and Kovalenko P.I. Typing basins of Crimea in agricultural landscapes and environmental burden on them. *Nauch. Zhurn. Ros. NII probl. Melior.* 2013. No. 4(12). P. 157–167. (in Russ.)
12. Lindsay J.B. The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research UK 22<sup>nd</sup> Annual Conference. *The Univ. of Glasgow*. 2014.
13. SRTM data [elektron. res.]. – <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. (data obrash. 15.01.2016)
14. Szaby G., Singh S.K., and Szaby S. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2015. Vol. 83–84. P. 137–145.
15. O'Callaghan J. and Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vis. Graph. Image Process.* 1984. Vol. 28(3). P. 323–344.

16. Pogorelov A.V. and Dumit Zh.A. Rel'ef basseyna reki Kubani: morfologicheskii analiz (The relief of the Kuban River basin: morphological analysis). Moscow: GEOS (Publ.), 2009. 218 p. (in Russ.)
17. Ermolayev O.P., Malcev K.A., and Ivanov M.A. Automated building basin geosystems boundaries for the Volga Federal District. *Geogr. Priir. Resur.* 2014. No. 3. P. 32–39. (in Russ.)
18. Lastochkin A.N. Rel'ef zemnoj poverhnosti (Principy i metody staticheskoy geomorfologii) (The relief of the earth's surface (Principles and methods of static geomorphology)). Leningrad: Nedra (Publ.), 1991. 340 p.
19. Simonov Yu.G. Morfometricheskii analiz relefa (The morphometric analysis of relief). Moskva-Smolensk: Izd-vo SGU (Publ.), 1998. 272 p.
20. Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology.* 1995. Vol. 27. P. 373–390.
21. Shary P., Sharaya L., and Mitusov A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma.* 2002. Vol. 107 (1–2). P. 1–32.
22. Florinsky I. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *Intern. Journ. of Geograph. Inform. Sc.* 1998. No. 12 (1). P. 47–62.
23. Zevenbergen, L. and Thorne C. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes Landforms.* 1987. Vol. 12. P. 47–56.
24. Pennock D., Zebarth B., and de Jong E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain. *Geoderma.* 1987. Vol. 40. P. 297–315.
25. Kochetkova Yu.O. Ecological and geomorphological evaluation of morphometric characteristics of the relief of the Ryazan region. *Vestn. Volzh. Univ.* 2011. No. 12. 25 p. (in Russ.)
26. Pogorelov A.V. Experience of automated identification of elements of the morphological structures of the Greater Caucasus. *Inzhener. Izyskan.* 2010. No. 5. P. 32–35. (in Russ.)
27. Chupina D.A. An automatic identification of landforms and their complexes based on GIS analysis of morphometric parameters (Vengerovsk area of Novosibirsk Region as an example). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS).* 2014. No. 3. P. 43–50. (in Russ.)
28. Verhagen P. and Drăguț L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. *Journal of Archaeological Science.* 2012. Vol. 39. Iss. 3. P. 698–703.
29. Kassouk Z., Thouret J.-C., Gupta A., Solikhin A., and Liew S.C. Object-oriented classification of a high-spatial resolution SPOT5 image for mapping geology and landforms of active volcanoes: Semeru case study, Indonesia. *Geomorphology.* 2014. Vol. 221. P. 18–33.
30. Burrough P.A. and McDonell R.A. Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 1998. 190 p.
31. Mordvincev M.M. and Kuvalkin A.V. Methods of typing parts of the catchment area for the construction of computational models “Precipitation–Stock”, in *XIII Plen. Interuniv. Coord. Meeting on the probl. of erosion, fluvial and estuarine processes (Naberezhnye Chelny, 8–10 October 2015)*. Naberezhnye Chelny. 2015. P. 176–179. (in Russ.)
32. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association.* 1963. Vol. 58. No. 301. P. 236–244.
33. Morfostruktura i morfoskulptura platformennykh oblastej ravnin SSSR (Morphostructure and morphosculpture of the USSR platform regions). Moscow: Nauka (Publ.), 1986. 195 p.

Received 11.03.2016

Accepted 14.03.2017